0254-6124/2015/35(1)-018–08 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Huang Wengeng, Shen Hua, Liu Siqing, Zhong Qiuzhen, Chen Yanhong. Fluctuations of high-energy electron fluxes in Earth's radiation belt and its applications for geomagnetic storm alert (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2015, **35**(1): 18-25, doi:10.11728/cjss2015.01.018

辐射带高能电子通量波动与地磁暴警报*

黄文耿 沈 华 刘四清 钟秋珍 陈艳红

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

摘 要 地球磁场捕获带电粒子形成辐射带, 地磁场的扰动将导致带电粒子通量的变化. 根据磁暴期间外辐射带高能电子通量起伏和波动的特点及规律, 利用 GOES 卫星实时发布的 5 min 分辨率高能电子微分通量数据, 构建了高能电子通量波动指数, 并分析了该指数与地磁活动的关系. 结果表明, 所提出的高能电子通量波动指数与地磁事件有很好的相关性, 能起到地磁暴发生的指示剂作用, 相对于目前空间环境业务化预报过程中广泛使用的 3 h Kp 指数, 高能电子通量波动指数能更早地警报地磁暴的发生, 是潜在有效的地磁暴警报辅助手段, 能为空间环境预报中的地磁暴实时警报提供重要参考.

关键词 高能电子, 辐射带, 磁暴, Kp 指数

中图分类号 P 353

Fluctuations of High-energy Electron Fluxes in Earth's Radiation Belt and its Applications for Geomagnetic Storm Alert

HUANG Wengeng SHEN Hua LIU Siqing ZHONG Qiuzhen CHEN Yanhong

(*Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

Abstract The outer radiation belt consists mainly of high energy electrons trapped by the Earth's magnetic field. The disturbance of the geomagnetic field caused by the Coronal Mass Ejection (CME) or the Co-rotating Interaction Region (CIR) can result in electron radiation belt variations. According to the variation feature of high energy electron flux in the outer radiation belt during magnetic storms, a novel index referred to as high electron flux fluctuation index was evaluated by using the 5-min resolution sampled electron flux data provided by GOES, and its correlation with geomagnetic Kp index was analyzed. It is found that high electron flux fluctuation index has a good correlation with geomagnetic Kp index, and the new index can be used as an indicator of geomagnetic storm occurrence. In comparison with 3-hour Kp index, which is wildly used in space environment operation prediction system, the suggested index in this paper can alert geomagnetic

* 国家重点基础研究计划项目资助 (2011CB811406, 2012CB825606)

2014-02-26 收到原稿, 2014-05-16 收到修定稿

E-mail: huangwg@nssc.ac.cn

storm occurrence earlier.

Key words High energy electron, Radiation belt, Geomagnetic storm, Kp index

0 引言

地磁暴是一种灾害性的空间天气事件, 可以威胁到近地空间航天器的正常运行及地面电力系统的安全, 因此磁暴的警报和预报是空间天气预报的核心内容 [1]. 通常认为地磁暴的扰动源来自于太阳日冕物质抛射 (CME) 和冕洞高速流形成的共转作用区 (CIR), 目前利用 SOHO 和 ACE 卫星的观测数据, 大致可以判断未来一段时间内发生磁暴的概率, 但具体到在小时量级的时间尺度内预测是否有磁暴发生还有较大困难. 当前美国国家海洋大气局 (NOAA) 的空间天气预报中心 (SWPC) 使用 Kp 指数对地磁暴的级别进行警报, Kp 指数是一种使用最广泛的地磁指数, 由位于亚极光带附近 13 个地面地磁台站的观测数据通过计算得到. 在空间天气业务化预报中, Kp 指数也有重要应用. 研究表明, 同步轨道卫星异常与 Kp 指数有很强的相关性 [2−3]. NOAA 通过互联网对外发布准实时估算的 Kp 指数 (Estimated Kp) 提供给空间环境研究的相关用户. Estimated Kp 指数每 3 h 更新一次, 由于 Kp 指数用来描述 3 h 内地球磁场的整体活动水平, 事实上准实时 Estimated Kp 指数代表前 3 h 内地磁扰动状况, 并且该指数是通过监测数据估算得到的, 发布时还会有约 30 min 的滞后, 例如 00:00 UT−03:00 UT 的 Kp 指数大约在 03:30 UT 时发布, 03:00 UT−06:00 UT 的 Kp 指数大约在 06:30 UT 时发布, 因此严格上讲, Estimated Kp 指数并没有达到地磁暴实时警报的作用和目的.

地球辐射带是由地球磁场对带电粒子的捕获而形成的, 外辐射带中的高能电子必然与地磁活动有很大的相关性. 磁暴期间, 外辐射带高能电子动力学演化过程非常复杂, 涉及到波动及扩散等一系列非线性物理过程 [4]. 目前完全理解高能电子的产生机制和损失机制还有一定困难, 一般认为外辐射带高能电子通量受到太阳风的控制 [5], 且随着地磁活动的变化而变化 [6]. GOES 卫星的观测表明 [7], 磁暴期间同步轨道高能电子通量有三种不同的响应. 从定性角度分析, 磁暴期间辐射带电子的增加或减少是各种加速机制与减速机制共同作用的结果, 它们之间为相互竞争的过程 [8−9]. 观测及研究结果表明 [10], 地球磁场扰动与辐射带高能电子通量波动有很强的相关性, 不论是 CIR 产生的磁暴还是 CME 产生的磁暴, 辐射带高能电子通量在磁暴开始时均有一个明显下降过程, 然后逐渐恢复 [11]. 从小时的时间尺度来看, GOES 卫星观测结果显示, 磁暴主相期间同步轨道高能电子微分通量变化是不规则的, 存在不同幅度的波动和起伏, 特别是大磁暴期间这种变化更加显著.

本文根据磁暴期间辐射带高能电子通量波动的特点和规律, 以及其与地磁 Kp 指数的相关性, 利用经验正交函数 (EOF) 分析了同步轨道高能电子通量的周日变化规律, 进而利用 GOES 卫星实时发布的大于 0.6 MeV 高能电子微分通量数据, 构建了一个高能电子波动指数, 通过与 Kp 指数的比较和分析, 为高能电子波动指数在空间天气预报和服务中的应用提供依据.

1 同步轨道高能电子变化

图 1 为 SWPC 给出的一次磁暴期间 GOES 卫星观测实例. 从图 1 可以明显看出, 磁暴发生前, 高能电子通量的变化十分规则且变化幅度很小, 而磁暴发生时, 通量的波动和起伏十分明显, 如图 1 中圆圈区域所示.

利用经验正交函数 (Empirical Orthogonal Function, EOF) 对地球同步轨道卫星观测的高能电子通量数据进行分析, 数据来源于 OMNI 数据库提供的 GOES-11 卫星观测的大于 0.6 MeV 的 5 min 分辨率数据, 观测时间为 2006 年 7 月至 2010 年 12 月. 首先将观测数据 $f(d,n_t)$ 按照下式进行 EOF 展开:

$$f(d,n_t)=\sum_{k=1}^{n}A_k(d)\times E_k(n_t).$$

其中, d 表示天数, n_t 表示观测时间点, 一天的观测时间点为 $24\times 60/5=288$ 个. A_k 为第 k 阶 EOF 系数, E_k 为对应的第 k 阶正交基函数, 表征高能电子通量的日变化, 关于 EOF 系数和基函数的详细估算方法可参考文献 [12].

* http://www.swpc.noaa.gov

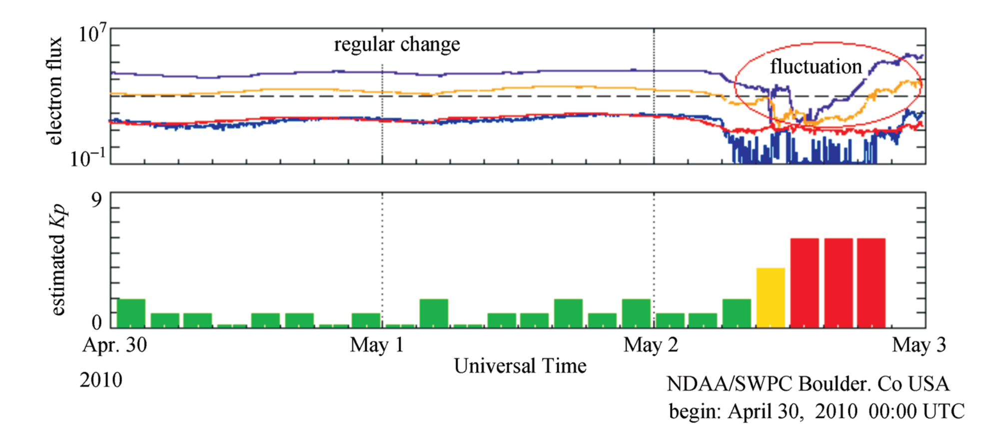


图 1 一次磁暴期间的高能电子波动 *

Fig. 1 Fluctuations of radiation belt high-energy electrons during a magnetic storm

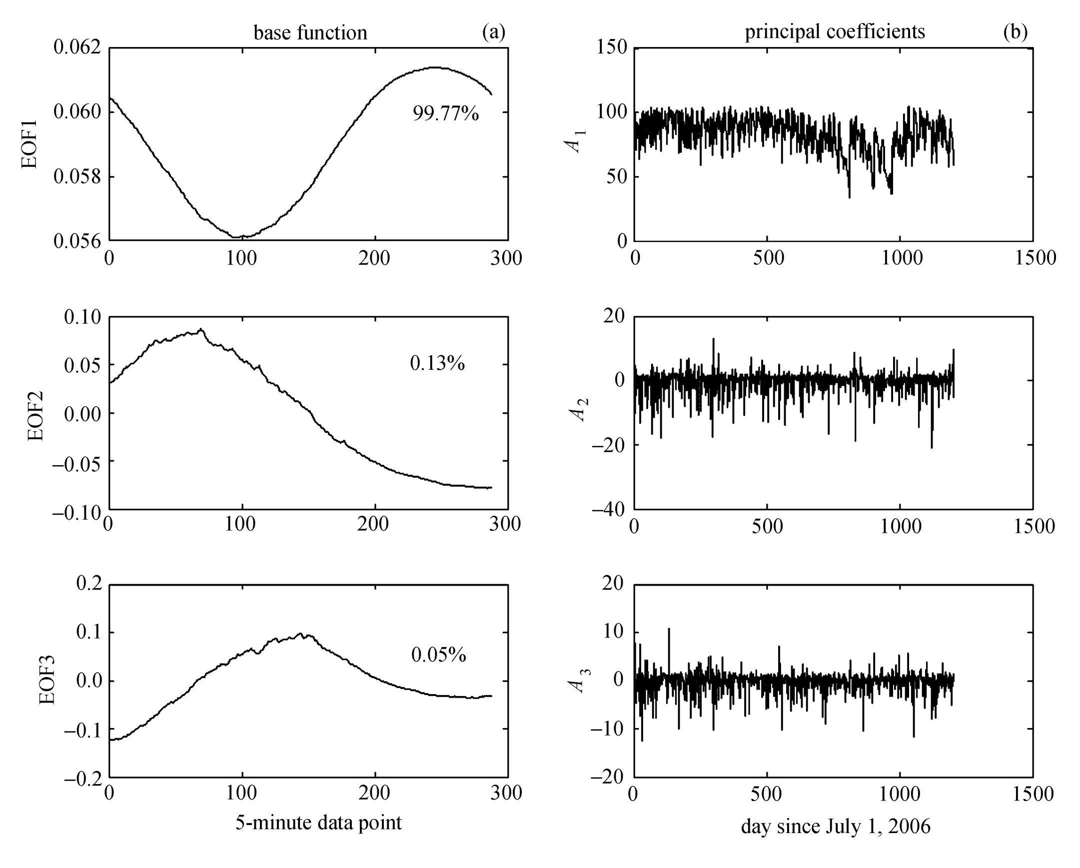


图 2 前三阶基函数及其系数

Fig. 2 EOF base function and its coefficients

图 2 给出的是前三阶基函数及其系数, 结果表明 EOF 方法收敛速度很快, 第一阶级数就能反映 99.77% 的真实变化, 表明了高能电子通量平均日变化特征. 从图 2 可以看出, GOES 卫星观测到的高能电子通量在 12:00 LT 左右出现极大值, 在 00:00 LT 左右出现极小值. 由于 GOES-11 卫星为地球同步卫星, 位于西经 135° 的赤道上空, 这一结果正好与 GOES 卫星所在处磁层的晨昏不对称特征相符, 也说明了本文分析方法的正确性. 在地球同步轨道附近存在不同性质的低频波, 例如哨声波合声 (chorus),

这些波对磁层中不同区域电子的加速机制具有重要影响, 但 GOES 卫星高能电子日变化特征主要是由于 L 值的变化引起的.

2 高能电子通量波动指数

一般情况下, 同步轨道高能电子通量具有规则的日变化特征, 为消除这种变化趋势, 本文对 GOES 卫星观测到的大于 0.6 MeV 高能电子微分通量 5 min 分辨率数据取相对变化值 $r(t)$, 而后对 $r(t)$ 取 1 h 的标准差计算, 得到高能电子通量波动指数 $S_{\rm e}$, $S_{\rm e}$ 的表现形式与描述电离层幅度闪烁指数 S_4 相似 [13], 可以用来描述真实数据的波动程度, 具体表达如下:

$$S_{\rm e}=\sqrt{\frac{\langle r(t)^2\rangle-\langle r(t)\rangle^2}{\langle r(t)^2\rangle}},$$

其中, $r(t)=\dfrac{f(d,n_t)}{f(d,n_{t-1})}$.

在地磁平静期间, 地球同步轨道高能电子微分通量在 5 min 时间内的相对变化很小, 因此 $r(t)$ 的数值应该在 1 附近变化, 但是在磁暴期间, 特别是磁暴的初始相和主相期间, $r(t)$ 会有较大的波动, 如图 3 所示. 对高能电子通量波动指数 $S_{\rm e}$ 取 5 min 滑动值, 就可以得到一系列的数值来描述高能电子波动和起伏程度.

3 高能电子波动指数与 Kp 的相关性

地球磁场的扰动会导致外辐射带高能电子通量的波动和起伏, 根据上述构建的高能电子波动指数, 利用 GOES 卫星实时发布的大于 0.6 MeV 微分高能电子通量 5 min 分辨率数据, 给出该指数在几个不同地磁扰动条件下的响应事例, 并与 Kp 指数进行相关性分析. 图 4 给出了 2006 年 12 月 1—16 日 $S_{\rm e}$ 指数、Kp 指数的变化情况. 在此段时间的前 5 天 (12 月 1—5 日) 地磁平静, Kp 指数均小于 4; 12 月 6—13 日, 地磁以平静和微扰 ($Kp=4$) 为主, 偶尔出现了几次短时间的小磁暴 ($Kp=5$); 12 月 14—15 日连续发生了地磁暴, 并且达到强磁暴 ($Kp>6$) 级别.

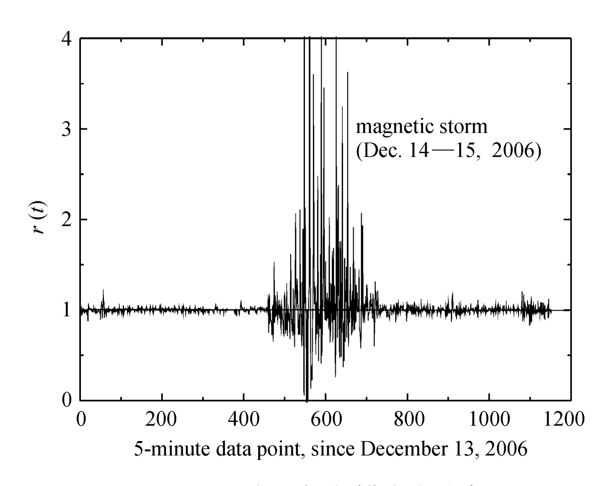


图 3 $r(t)$ 在一次磁暴期间的响应

Fig. 3 Response of $r(t)$ to a magnetic storm

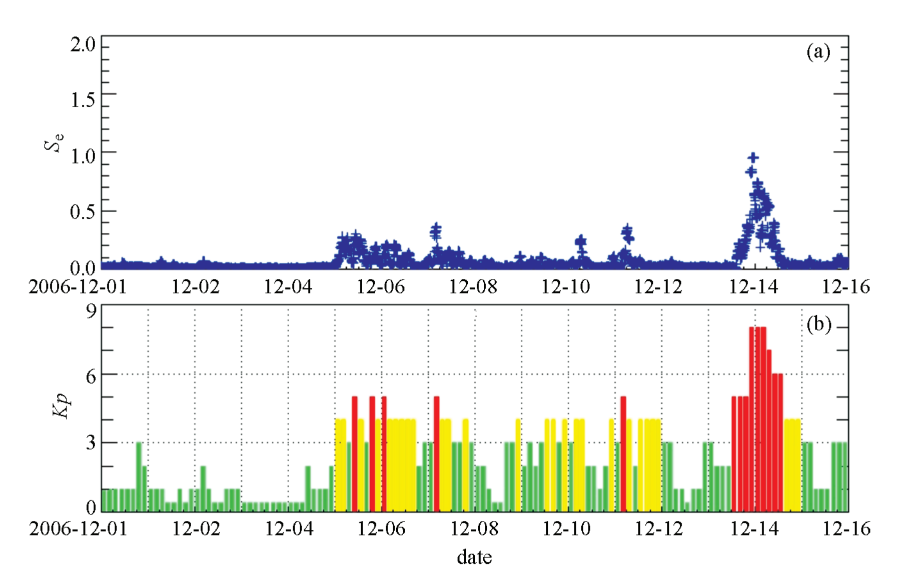
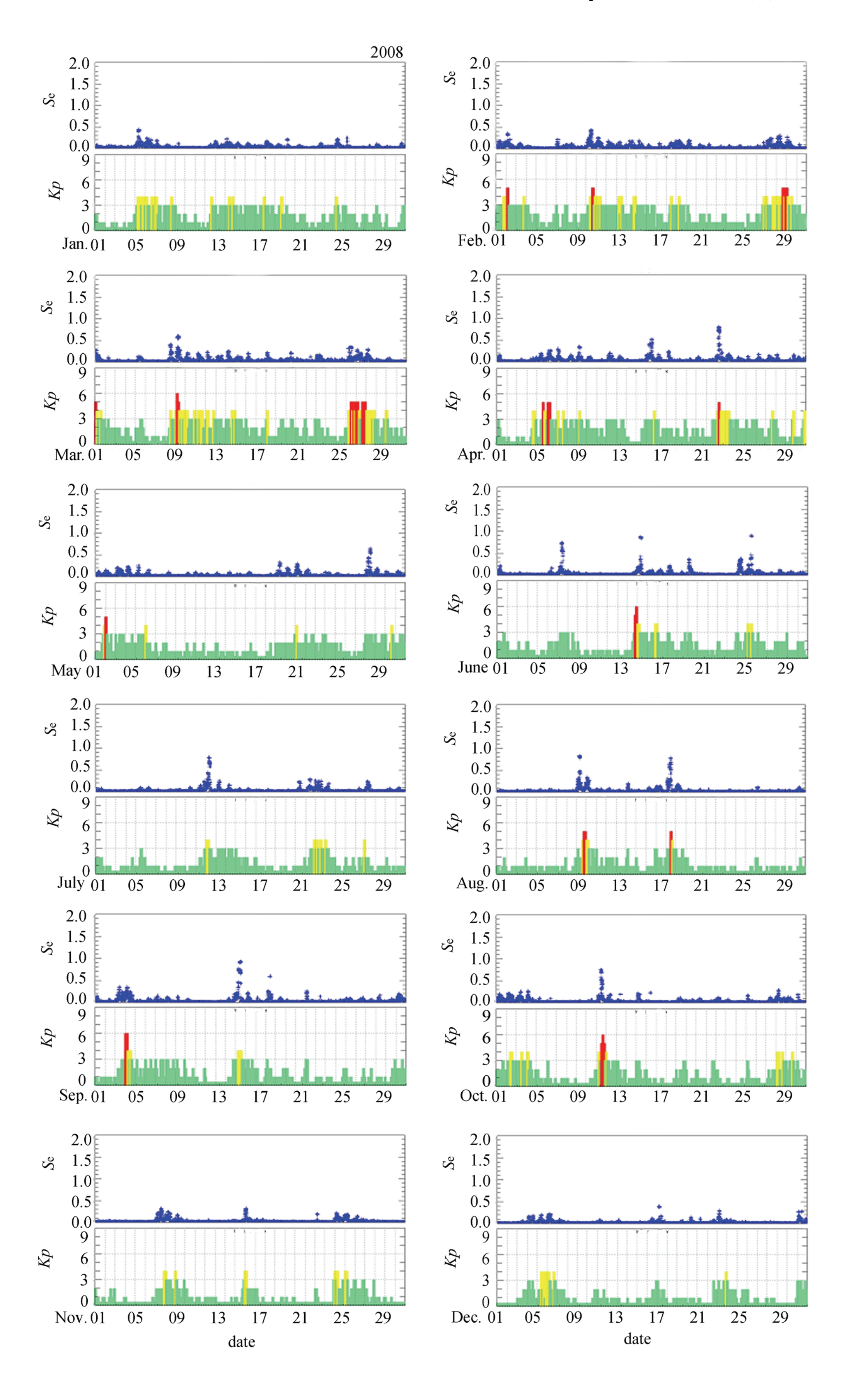
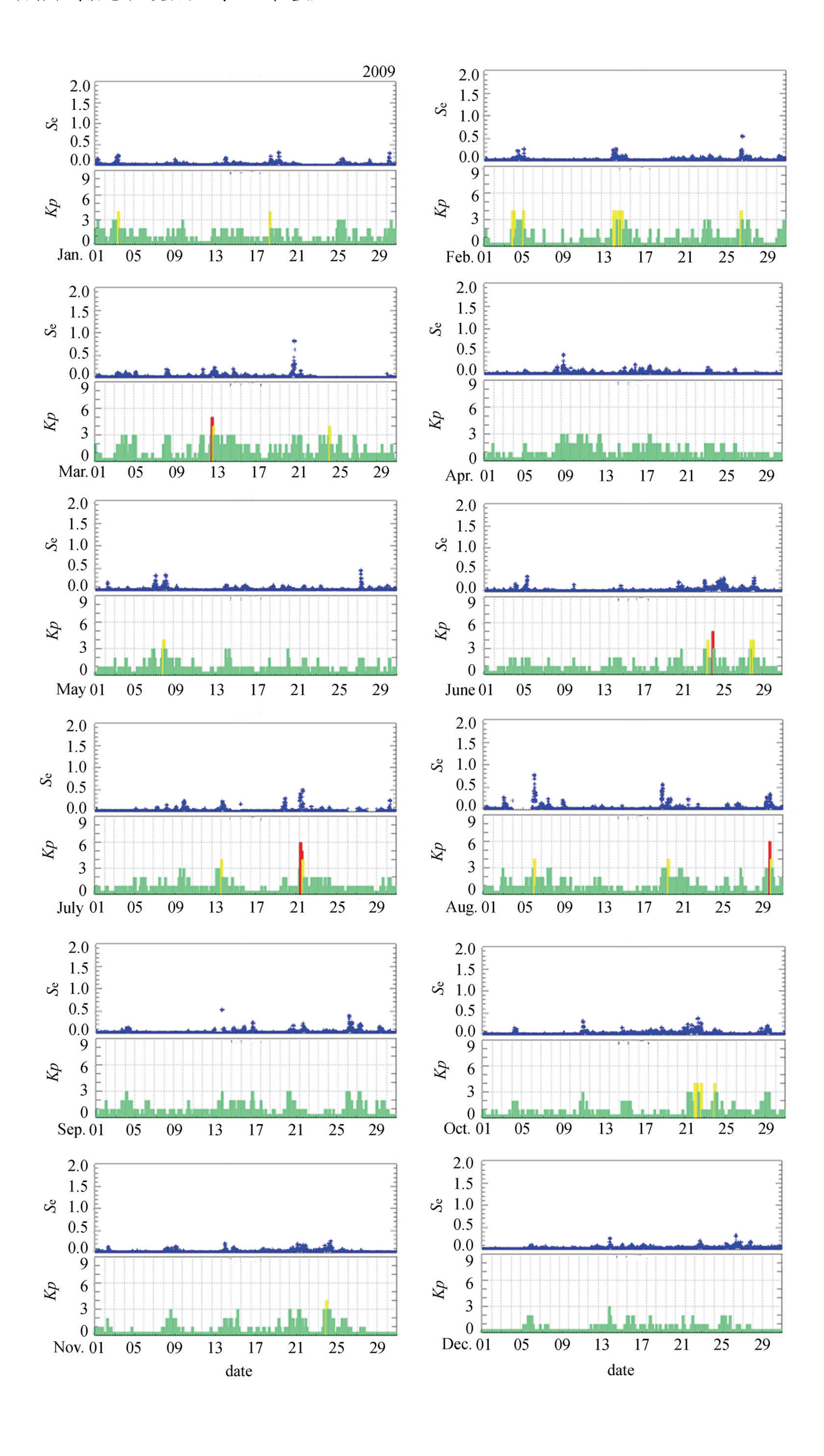


图 4 高能电子通量波动指数对一次磁暴的响应

Fig. 4 Response of high electron flux fluctuation index to a magnetic storm


2008
Se
Kp
Jan. 01 05 09 13 17 21 25 29
Feb. 01 05 09 13 17 21 25 29
Mar. 01 05 09 13 17 21 25 29
Apr. 01 05 09 13 17 21 25 29
May 01 05 09 13 17 21 25 29
June 01 05 09 13 17 21 25 29
July 01 05 09 13 17 21 25 29
Aug. 01 05 09 13 17 21 25 29
Sep. 01 05 09 13 17 21 25 29
Oct. 01 05 09 13 17 21 25 29
Nov. 01 05 09 13 17 21 25 29
Dec. 01 05 09 13 17 21 25 29
date



2009
Se
Kp
Jan. 01 05 09 13 17 21 25 29
Feb. 01 05 09 13 17 21 25 29
Mar. 01 05 09 13 17 21 25 29
Apr. 01 05 09 13 17 21 25 29
May 01 05 09 13 17 21 25 29
June 01 05 09 13 17 21 25 29
July 01 05 09 13 17 21 25 29
Aug. 01 05 09 13 17 21 25 29
Sep. 01 05 09 13 17 21 25 29
Oct. 01 05 09 13 17 21 25 29
Nov. 01 05 09 13 17 21 25 29
Dec. 01 05 09 13 17 21 25 29
date

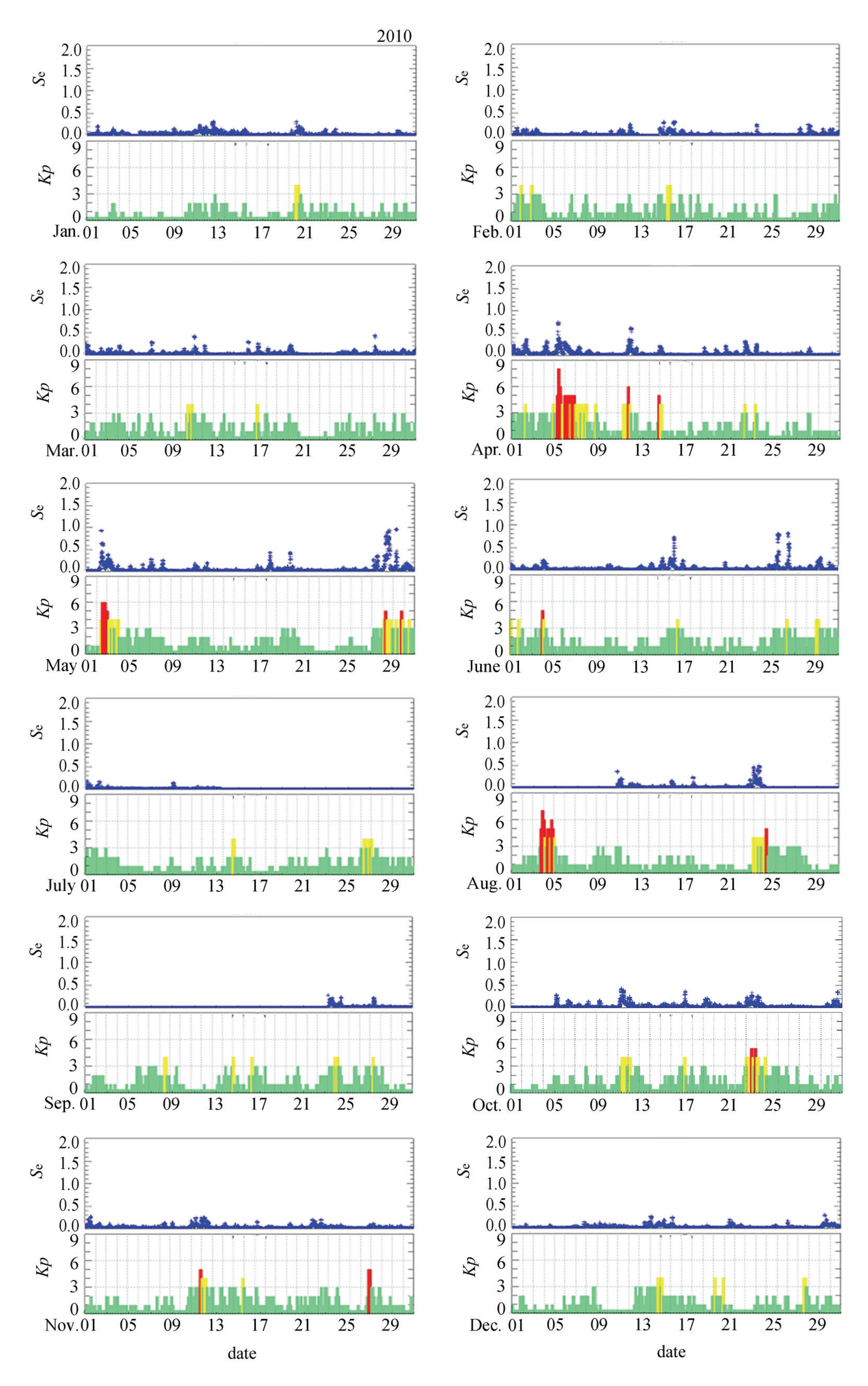


图 5 2008 年 1 月 1 日至 2010 年 12 月 1 日期间 S_e 指数及与 Kp 指数的比较

Fig. 5 Comparison of S_e index with Kp from Jan. 2008 to Dec. 2012

图 4 表明, 在地磁平静期间高能电子通量变化规则, 没有大的波动和起伏, 同时 S_e 指数平稳且很小, 数值均在 0.02 以下. 在地磁微扰和小磁暴期间, 高能电子通量随地磁变化非常迅速, 出现明显的波动和起伏, 同时 S_e 指数也有明显增加, 随着地磁逐渐恢复平静, S_e 指数迅速减小且趋于平稳. 当强地磁暴发生时, 电子通量波动幅度增大, S_e 指数也随即增加, 增加幅度更为显著, 但增加量并不与 Kp 成简单的线性关系. 从图 4 还可以明显看出, S_e 指数比 Kp 指数能更早地反映出地磁扰动情况, 这主要是由于 S_e 指数是通过 5 min 分辨率的数据计算得到的, 而 Kp 指数是 3 h 的地磁指数. 图 5 给出了 2006 年 1 月至 2008 年 12 月相应 S_e 指数和 Kp 指数的对应关系, 其中 2010 年 7−9 月部分天数 GOES 卫星缺乏数据. 图 5 结果显示, 在地磁平静期间, 几乎所有 S_e 指数数值均在 0.1 以下, 变化很小, 随着地磁活动的增强, S_e 指数响应迅速, 变化明显. 在所有地磁微扰和磁暴期间, S_e 指数均有显著增加. 这一结果表明, 相对 3 h Kp 指数, S_e 指数能提前定性地警报地磁暴的发生, 可以作为潜在的地磁暴警报手段, 为空间环境预报中地磁暴的实时警报提供必要参考.

4 结论和讨论

地磁场捕获带电粒子形成辐射带, 地球磁场的扰动必然会影响到带电粒子通量的变化. 由于太阳风与磁层之间的耦合, 能量在磁层输运和转化过程中, 磁层会有等离子体波动的激发和耗散, 波–粒相互作用导致磁层动力学过程非常复杂, 高能带电粒子通量的增减由多种物理机制共同决定. 根据磁暴期间外辐射带中高能电子通量起伏和波动的特点及规律, 利用 GOES 卫星 5 min 实时数据, 构建了高能电子通量波动指数以实时警报地磁暴的发生. 结果表明, 本文提出的高能电子通量波动指数与地磁事件有很好的相关性, 能起到地磁暴发生与否指示剂的作用, 相对于目前空间环境业务化预报过程中广泛使用的 3 h Kp 指数, 该指数能更早警报地磁暴的发生. 本文提出的方法也可以使用其他数据, 例如地磁场 H 分量来实时警报地磁暴的发生.

需要说明的是, 利用微分通量数据可以分析磁暴期间电子通量变化的大小及时间尺度等信息, 但还不能很好地用来辨别导致这些变化的物理机制. 另外, GOES 卫星高能电子探测数据在某些条件下 (例如太阳质子事件期间导致的观测数据改变), 可能会对指数大小有一定的影响. 磁层亚暴也是一种磁层扰动事件, 与磁暴相比, 虽然单个磁层亚暴持续的时间相对较短, 但对高能电子通量也具有一定影响, 对这一问题有待深入分析与研究.

致谢 GOES 卫星数据及 Kp 指数来自 OMNI 数据库.

参考文献

[1] Bala R, Reiff P. Improvents in short-term forecasting of geomagnetic activity [J]. *Space Weather*, 2012, **10**, S06001, doi:10.1029/2012SW000779

[2] Choi H S. Analysis of GEO spacecraft anomalies: Space weather relationships [J]. *Space Weather*, 2011, **9**, S06001, doi:10.1029/2010SW000597

[3] O'Brien T P. SEAES-GEO: A spacecraft environmental anomalies expert system for geosynchronous orbit [J]. *Space Weather*, 2009, **7**, S09003, doi:10.1029/2009-SW000473

[4] Tu W, Li X, Chen Y, *et al.* Storm-dependent radiation belt electron dynamic [J]. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, 2009, **114**, A02217, doi:10.1029/2008JA013480

[5] Williams D J. A 27-day periodicity in outer zone trapped electron intensities [J]. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, 1966, **71**:1815-1826

[6] Carpenter D L, Giles B L, Chappell C R, *et al.* Plasmasphere dynamics in the duskside bulge region: A new look at an old topic [J]. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, 1993, **98**, 19243, doi:10.1029/93JA00922

[7] Reeves G D. The global response of relativistic radiation belt electrons to the January 1997 magnetic cloud [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**:3265-3268

[8] Reeves G D, McAdams K L, Friedel R H W, *et al.* Acceleration and loss of relativistic electron during geomagnetic storms [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, **30**:1529-1532

[9] Friedel R H W, Reeves G D, Obara T. Relativistic electron dynamics in the inner magnetosphere a review [J]. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 2002, **64**:265-282

[10] Borovsky J E, Denton M H. Electron loss rates from the outer radiation belt caused by the filling of the outer plasmasphere: the calm before the storm [J]. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, 2009, **114**, A11203, doi:10.1029/2009-JA014063

[11] Su Z, Xiao F, Zheng H, *et al.* CRESS observation and STEERB simulation of the 9 October 1990 electron radiation belt dropout event [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2011, **38**, L06106, doi:10.1029/2011GL046873

[12] Storch H V, Zwiers F W. Statistical Analysis in Climate Research [M]. Cambridge: University Press, 2001

[13] Coco D. GPS-satellites of opportunity for ionospheric monitoring [J]. *GPS World*, 1991, **2**(9):47-50